

ВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ ПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РОССЫПЕЙ ШЛИХОВОГО ЗОЛОТА МЕТОДОМ МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ СЕПАРАЦИИ

© 2017 г. **С.И. Евдокимов, Т.Е. Герасименко**

Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет) (СКГМИ (ГТУ)), г. Владикавказ

Статья поступила в редакцию 29.03.17 г., доработана 21.04.17 г., подписана в печать 25.04.17 г.

Для выделения золота из продуктов обогащения россыпей рекомендуется процесс сепарации в ферромагнитной жидкости (ФМЖ). Процесс магнитоэжидкостной сепарации основан на появлении в ФМЖ дополнительной к гравитационной выталкивающей силе пондеромоторной силы неоднородного магнитного поля. В объеме среды разделения горизонтальная составляющая этой силы участвует в перемещении тел по эквипотенциальной поверхности поперек рабочей зоны – к стенкам сепарационной кюветы и в сторону центральной плоскости межполюсного зазора, а продольная составляющая – вдоль. С целью повышения технологических показателей процесса рекомендуется ограничить поперечные перемещения тел вертикальными перегородками, установленными в среде разделения вдоль межполюсного зазора сепаратора. Из результатов теоретического исследования движения частиц в рабочей зоне сепаратора следует, что влияние стенок проявляется в возникновении встречного направлению движения частиц потока, который является причиной роста гидродинамической силы сопротивления и снижения скорости движения частиц. Показано, что при наличии вертикальных стенок уменьшение времени нахождения легкой фракции шлиха в рабочей зоне сепаратора способствует росту производительности процесса по исходному питанию и производительности по тяжелой фракции (извлечению золота в тяжелую фракцию). С использованием методов математического планирования эксперимента выполнены исследовательские испытания конкурирующих способов сепарации на искусственных смесях минералов и на тяжелых золотосодержащих шлихах, выделенных из песков россыпи. Доказано, что при переходе от сепарации в объеме ФМЖ к сепарации разработанным способом производительность аппарата увеличивается на 9 %, а извлечение золота в тяжелую фракцию – с 84,34 до 91,77 % за счет уменьшения потерь с легкой фракцией с 15,46 до 7,96 %. При снижении выхода тяжелой фракции на 11,6 отн.% получен материал, содержащий более 800 кг/т золота.

Ключевые слова: извлечение золота, магнитоэжидкостная сепарация, вертикальные перегородки, сравнительные испытания, повышение производительности.

Евдокимов С.И. – канд. техн. наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых СКГМИ (ГТУ) (362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44). Тел.: (8672) 407-334. E-mail: eva-ser@mail.ru.

Герасименко Т.Е. – канд. техн. наук, нач. отдела интеллектуальной собственности СКГМИ (ГТУ). Тел.: (8672) 407-164. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru.

Для цитирования: *Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е.* Выделение из продуктов обогащения россыпей шлихового золота методом магнитоэжидкостной сепарации // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 5. С. 4–12.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-5-4-12.

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E.

Magnetic fluid separation of alluvial gold from placer beneficiation products

The process of separation in a ferrofluid is recommended for gold separation from placer beneficiation products. The process of magnetic fluid separation is based on the ponderomotive force of the inhomogeneous magnetic field appeared in ferrofluids in addition to the pushing gravity force. The horizontal component of this force in a separation medium participates in the movement of bodies along an equipotential surface across the working area – to the separation cell walls and towards the central plane of the pole gap, and the longitudinal component participates in the movement along the working area. In order to improve the technological parameters of the process, it is recommended to limit the transverse displacements of the bodies by vertical partitions installed in the separation medium along the separator pole gap. The theoretical study results regarding particle motion in the separator working area suggest that the wall effect is manifested in the appearance of a flow opposite to the direction of particle motion. This increases the hydrodynamic drag force and reduces the speed of particle movement. It is shown that the decrease in the time of light concentrate fraction presence in the separator working area with vertical walls promotes an increase in the productivity of the process with respect to the initial feed and heavy fraction productivity (gold extraction into the heavy fraction). The mathematical methods of experimental design were used to perform investigation tests of competing methods of separation on artificial mineral mixtures and heavy gold-bearing concentrates isolated from placer sands. It has been proved that the transition from ferrofluid volume separation to separation using the developed

method increases the unit productivity by 9 %, and the gold extraction into the heavy fraction from 84,34 to 91,77 % due to light fraction losses reduced from 15,46 to 7,96 %. Heavy fraction yield lowered by 11,6 rel.% made it possible to obtain a material containing over 800 kg per ton of gold.

Keywords: gold recovery, magnetic fluid separation, vertical partitions, comparative tests, increased productivity.

Evdokimov S.I. — Cand. Sci. (Tech.), assistant prof. of the Department of mineral processing of the North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (362021, Russia, Republic of North Ossetia — Alania, Vladikavkaz, Nikolaev str., 44). E-mail: eva-ser@mail.ru.

Gerasimenko T.E. — Cand. Sci. (Tech.), head of the Department of intellectual property of the North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). E-mail: gerasimenko_74@mail.ru.

Citation: Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E. Vydelenie iz produktov obogashcheniya rossypei shlikhovogo zolota metodom magnitnozhidkostnoi separatsii. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 5. P. 4–12.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-5-4-12.

Введение

Для малых горных золотодобывающих предприятий стратегической линией является получение высоколиквидной товарной продукции в виде слитков лигатурного золота. Актуальность такого подхода определяется высокими затратами на транспортировку и металлургическую переработку концентратов с низким содержанием золота, расхождениями между поставщиком и переработчиком в определении их ценности, долговременностью и ненадежностью расчетов за поставленный металл, сравнительно низким извлечением золота.

Для выделения из продуктов обогащения россыпей природного сплава металлов (мас. %: Au — от 70 до 100, Ag — до 30) — шлихового золота, направляемого на плавку на месте его производства, достаточно широко применяют процесс сепарации в магнитной жидкости [1–4]. Ферромагнитные жидкости (феррофлюиды, ферроколлоиды) представляют собой коллоидные растворы магнитных частиц [5–9]. За счет этих частиц жидкости могут ощутимо взаимодействовать с внешним магнитным полем, не теряя при этом текучести и других свойств, присущих жидкости. Наиболее распространенный путь получения таких частиц — действие оснований на раствор смеси солей железа (Fe^{2+} и Fe^{3+}). Образующиеся наночастицы кубической шпинели Fe_3O_4 (магнетита) после обработки стабилизатором переводят в жидкость-носитель.

Процесс магнитожиidкостной сепарации (МЖ-сепарации) основан на появлении в ферромагнитной жидкости (ФМЖ) дополнительной к гравитационной ($f_{\text{гр}}$) объемной пондеромоторной силы неоднородного магнитного поля ($f_{\text{мг}}$) [10]:

$$f_{\text{гр}} + f_{\text{мг}} = \rho_0 g + \mu_0 (M \cdot \nabla) \cdot H = f_{\Sigma}, \quad (1)$$

где f_{Σ} — удельная выталкивающая сила, Н/м³; ρ_0 —

физическая плотность ФМЖ, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; μ_0 — магнитная восприимчивость вакуума, Гн/м; M — намагниченность ФМЖ, А/м; ∇H — градиент напряженности магнитного поля, А/м².

Намагничивание ФМЖ в неоднородном магнитном поле МЖ-сепаратора приводит к росту пондеромоторных сил ($f_{\text{мг}}$) и, как следствие, градиента давления в ФМЖ. Такое явление можно рассматривать как квазиутяжеление ФМЖ от физической (ρ_0) до эффективной ($\rho_{\text{эф}}$) плотности:

$$\rho_{\text{эф}} = f_{\Sigma}/g = \rho_0 + g^{-1} \mu_0 (M \cdot \nabla) \cdot H, \quad (2)$$

и, следовательно, разделение по плотности немагнитных тел (намагниченность которых мала по сравнению с намагниченностью ФМЖ) можно регулировать величиной градиента магнитного поля — например, за счет изменения тока в обмотке возбуждения электромагнита [11].

Теоретическая часть

Для разделения частиц по плотности по высоте рабочего зазора МЖ-сепаратора в направлении оси OY с помощью формы полюсных наконечников создают неоднородное магнитное поле. На тело, помещенное в квазиутяжеленную ФМЖ, действуют: пондеромоторная сила магнитного происхождения $F_{\text{мг}}$, выталкивающая немагнитное тело в область слабого поля; сила тяжести; сила Архимеда ($F_{\text{А}}$); сила сопротивления среды, обусловленная вязкостью ФМЖ. Причиной движения частиц в разделительном массопереносе при МЖ-сепарации, определяющей его результат, являются составляющие силы $F_{\text{мг}}$ — вертикальная, горизонтальная и продольная [12]. Величину погружения

(*h*) тела в среду разделения в направлении оси *OY* до поверхности, во всех точках которой плотность ФМЖ равна $\rho_{эф}$ (до эквипотенциальной поверхности выталкивающей силы), определяет результирующее действие силы F_A и вертикальной составляющей силы $F_{MГ}$: $F_A + F_{MГ}^{OY} = F_{\Sigma}$.

При условии $\rho_1 g V_1 < F_{\Sigma}$ и $\rho_2 g V_2 > F_{\Sigma}$ тела с индексами 1 и 2 погружаются в объем ФМЖ на разную глубину — h_1 и h_2 , причем $h_1 < h_2$.

В объеме ФМЖ горизонтальная составляющая ($F_{MГ}^r$) силы $F_{MГ}$ участвует в перемещении тел поперек рабочей зоны к стенкам сепарационной кюветы и в сторону центральной плоскости межполюсного зазора, а продольная составляющая ($F_{MГ}^n$) — вдоль зазора.

Поперечные перемещения тел снижают точность разделения по плотности и производительность процесса сепарации [12]. В работе с целью ограничения поперечных перемещений тел под действием $F_{MГ}^r$ в сепарационную кювету установили два пакета (с зазором) вертикальных перегородок, образовавших узкие рабочие зоны. Удаление

легкой фракции из рабочей зоны осуществляют с помощью пакета горизонтальных пластин (рис. 1).

Исследовано влияние вертикальной стенки на движение вдоль нее расположенной на расстоянии l частицы размером R ($R/l \ll 1$). Представим движение частицы в виде суперпозиции движения в направлении, параллельном стенке (вдоль оси *OY*), и движения в направлении, перпендикулярном к ней (вдоль оси *OX*).

Взаимодействие в системе жидкость—твердое заключается в том, что жидкость действует на частицу с силой Бернулли:

$$F_x = \frac{4}{3} \pi \rho_1 R^3 \left(\delta + \frac{1}{2} + \frac{3}{32} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{du_x}{dt} - \frac{2}{3} \pi \rho_1 R^3 \left(1 + \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{dv_x}{dt} + \frac{1}{8} \pi \rho_1 \frac{R^3}{y^3} \frac{d(u_x - v_x)}{dt} - \frac{3}{8} \pi \rho_1 (u_x - v_x)(u_y - v_y), \quad (3)$$

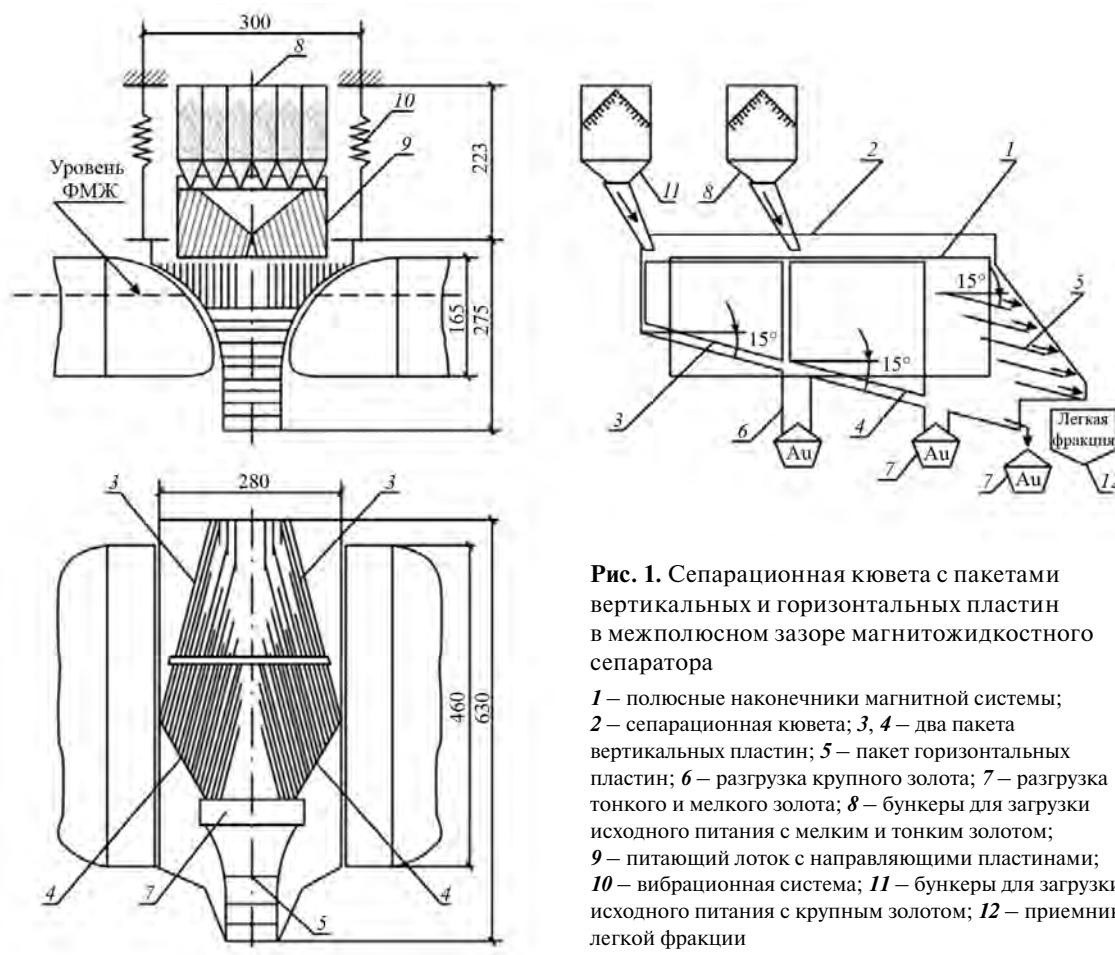


Рис. 1. Сепарационная кювета с пакетами вертикальных и горизонтальных пластин в межполюсном зазоре магнитожидкостного сепаратора

1 — полюсные наконечники магнитной системы; 2 — сепарационная кювета; 3, 4 — два пакета вертикальных пластин; 5 — пакет горизонтальных пластин; 6 — разгрузка крупного золота; 7 — разгрузка тонкого и мелкого золота; 8 — бункеры для загрузки исходного питания с мелким и тонким золотом; 9 — питающий лоток с направляющими пластинами; 10 — вибрационная система; 11 — бункеры для загрузки исходного питания с крупным золотом; 12 — приемник легкой фракции

$$F_y = \frac{4}{3}\pi\rho_1 R^3 \left(\delta + \frac{1}{2} + \frac{3}{32} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{du_y}{dt} - \frac{2}{3}\pi\rho_1 R^3 \left(1 + \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{dv_y}{dt} + \frac{1}{4}\pi\rho_1 \frac{R^3}{y^3} \frac{d(u_y - v_y)}{dt} - \frac{3}{8}\pi\rho_1 \left[(u_y - v_y)^2 - \frac{1}{2} (u_x - v_x)^2 \right], \quad (4)$$

определяемой подстановкой в уравнение Лагранжа

$$F_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial u_i} \right) - \frac{\partial E}{\partial x_i} \quad (5)$$

выражения для полной кинетической энергии системы (E) [13]. Здесь u_i , x_i — соответственно обобщенные скорость и координата частицы; ρ_1 , ρ_2 — соответственно плотность жидкости и частицы; $\delta = \rho_2/\rho_1$; u_x , u_y — проекции скорости частицы $\vec{u}(t)$ в декартовой системе координат на соответствующие оси; v_x , v_y — проекции скорости жидкости $\vec{v}(t)$ на соответствующие оси; $dx/dt = u_x - v_x$ и $dy/dt = u_y - v_y$.

В жидкости с кинематической вязкостью ν из условия равенства компонентов силы Бернулли (3) и (4) силе сопротивления в гравитационном поле с ускорением \vec{g} :

$$\vec{F} = \frac{4}{3}\pi\rho_1 R^3 (\delta - 1) \vec{g} + 6\pi\rho_1 R \nu (\vec{u} - \vec{v}) + 6\pi\rho_1 R^3 \sqrt{\frac{\nu}{\pi}} \int_0^t \frac{d}{d\tau} (\vec{u} - \vec{v}) \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}} \quad (6)$$

запишем уравнение движения частицы:

$$\begin{aligned} \left(1 + b \frac{1}{16} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{du_x}{dt} &= b \frac{dv_x}{dt} \left(1 + \frac{1}{16} \frac{R^3}{y^3} \right) + \\ &+ (v_x - u_x) + \frac{c}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \left[\frac{d}{d\tau} (v_x - u_x) / \sqrt{t - \tau} \right] d\tau + \\ &+ b \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^4} (v_x - u_x)(v_y - u_y), \quad (7) \\ \left(1 + b \frac{1}{8} \frac{R^3}{y^3} \right) \frac{du_y}{dt} &= b \frac{dv_y}{dt} \left(1 + \frac{1}{8} \frac{R^3}{y^3} \right) + \\ &+ a(v_y - u_y) + \frac{c}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{d}{d\tau} (v_y - u_y) \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}} dt + \\ &+ b \frac{3}{16} \frac{R^3}{y^4} \left[(v_y - u_y)^2 - \frac{1}{2} (v_x - u_x)^2 \right] - g \frac{\delta - 1}{\delta + 1/2}, \quad (8) \end{aligned}$$

где введены обозначения:

$$a = \frac{9\nu}{2R^2(\delta + 1/2)}; \quad b = \frac{3}{2(\delta + 1/2)}; \quad c = \frac{9\sqrt{\pi}}{2R(\delta + 1/2)}.$$

Из выражений (7) и (8) следует, что при переходе от движения частицы в свободной жидкости к движению вдоль стенки в выражение для гидродинамической силы необходимо ввести поправку $Z_{R,l} = (R/l)^3$. Физически наличие стенки проявляется в том, что осциллирующий режим движения частицы быстро переходит в установившийся. В пространстве, ограниченном стенками аппарата, движение частицы, вследствие замещения объемов, индуцирует встречный поток жидкости. По сравнению с одиночной частицей в безграничном пространстве, появление встречного направления движения частиц потока является причиной роста гидродинамической силы сопротивления и снижения скорости движения частиц.

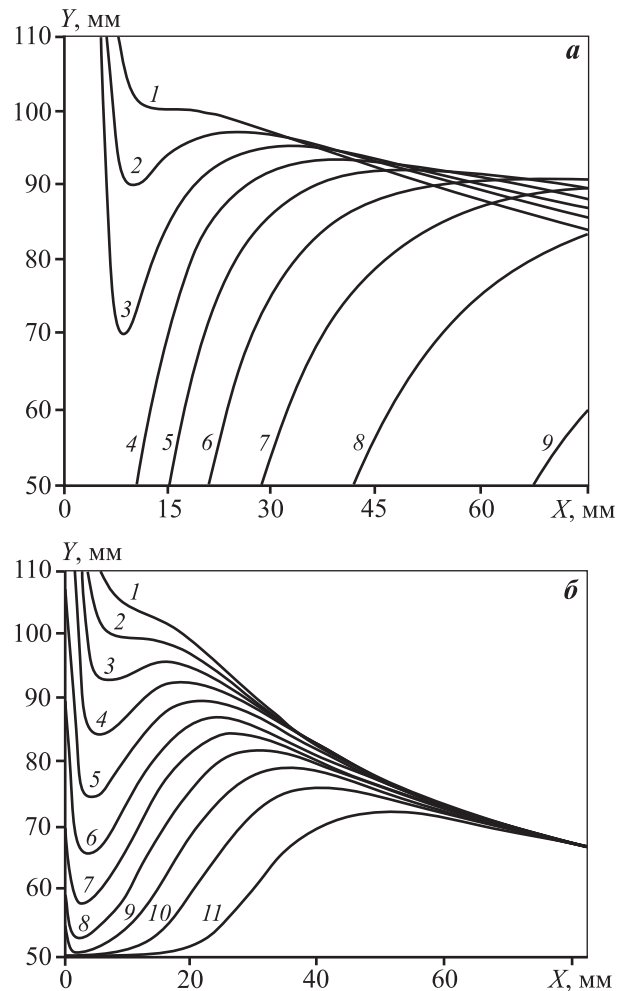


Рис. 2. Траектории движения при погружении частиц в объем ФМЖ (а) и в канал между вертикальными перегородками (б)

Из результатов расчета траекторий движения частиц в рабочей зоне МЖ-сепаратора следует, что падение частицы вдоль оси OY сменяется подъемом (см. рис. 2).

Гидравлическая крупность частиц увеличивается от кривой *I* к кривой *II*. При сепарации движение тел начинается с их погружения в ФМЖ ниже эквипотенциальной поверхности, которое сменяется подъемом на нее. При движении между вертикальными стенками время изменения направления вектора скорости частиц уменьшается. Следствием этого является рост производительности аппарата по исходному питанию (за счет уменьшения времени сепарации), повышение точности разделения и полноты извлечения золота: быстрое удаление легкой фракции из рабочей зоны позволяет перейти от сепарации в стесненных условиях к разделению в свободных условиях.

Разделение немагнитных частиц по плотности происходит с высокой точностью во всем объеме ФМЖ при условии $f_{\text{мг}} = \mu_0(M \cdot V) \cdot H = \text{const}$, которое выполняется только в узких рабочих зонах МЖ-сепараторов [14, 15]

Оборудование и материалы

Магнитожидкостный сепаратор изготовлен на базе подвешенного электромагнита ПЭ-160 с полюсными наконечниками гиперболического профиля с межполюсным зазором размером 70×460 мм. На оси симметрии межполюсного зазора на участке высотой 100 мм напряженность магнитного поля изменяется по линейному закону и ее градиент отклоняется от постоянного значения на 3—5 %.

Получение ФМЖ состояло в том, что кристаллизацию наноразмерного магнетита осуществляли методом гетерогенной химической конденсации по Зигмонди с соблюдением правила Веймарна, а стабилизацию магнетита в керосине (типа ТС-1) вели методом G.J. Fleer и J. Lyklema, смешивая защищенные и незащищенные олеиновой кислотой равные объемы коллоидных растворов магнетита [16—21]. В опытах использовали ФМЖ для длительной работы в сильных градиентных магнитных полях со следующими параметрами: плотность $\rho_0 = 0,895 \text{ г/см}^3$, намагниченность насыщения $M_s = 10,0 \text{ кА/м}$, динамическая вязкость $\eta = 0,00603 \text{ Па}\cdot\text{с}$, доля магнетита $\phi = 2,6 \text{ об.}\%$, поверхностное натяжение $\sigma = 23,5 \text{ дин/см}$.

Исследовательские испытания МЖ-сепаратора выполнены на искусственной смеси минералов

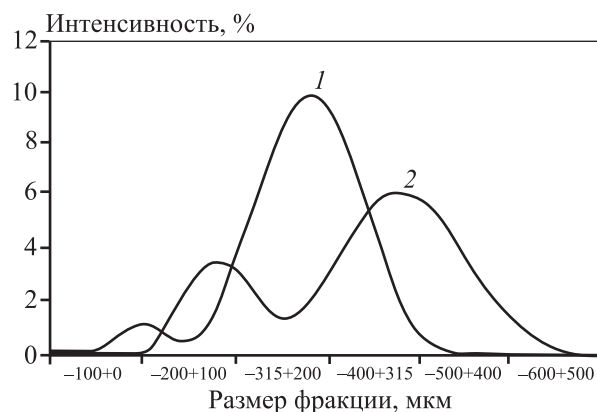


Рис. 3. Дифференциальные функции распределения по крупности галенита (1) и песков россыпи (2)

(рис. 3), составленной из мономинеральной фракции галенита и песков россыпи, сложенных серитизированными песчаниками и алевролитами, глинистыми сланцами и пироксилитом (содержание этих пород достигает 70 %), кварцем (25—30 %), полевыми шпатами (3—5 %), слюдой в виде серицита (2—3 %).

Объектом исследования были тяжелые шлихи, выделенные из россыпи золота долины р. Селемджа (ООО СА «Пилос и С», Амурская обл.). В шлихах золото содержится в виде весьма крупной фракции (+3,15 мм) — 1,0 %, крупной (−3,15+ +1,0 мм) — 11,5 %, средней (−1,0+0,315 мм) — 27,7 %, мелкой (−0,315+0,100 мм) — 53,7 %, весьма мелкой (−0,100+0,0315 мм) — 4,7 % и дисперсной фракции (−0,0315 мм) — 1,4 %. Золото представлено уплотненными пластинками, чешуйками, табличками. Золотины имеют гладкую поверхность желтого цвета со слабым красноватым оттенком, реже — мелкоямчатую, матовую. Проба колеблется от 870 до 935 ед. Магнетит и мартит составляют сильномагнитную фракцию шлиха, а ильменит — слабомагнитную, — их доля от всей массы шлиха ~60 %. В состав шлиха, кроме золота, входят галенит, самородные свинец и медь, касситерит, рутил, циркон, сфен, гранат, эпидот, пирит, сидерит, монацит.

Содержание золота в продуктах обогащения определяли пробирным анализом.

Результаты эксперимента и их обсуждение

С целью выяснения одновременного влияния удельной производительности по исходному питанию (X_1 , кг/ч на 1 см^2 площади межполюсного

зависимости от скорости сепарационной камеры с ФМЖ (X_2 , мм/с, измеряли прибором ИШВ-1) на функцию отклика (Y , %, — критерий Ханкока, рассчитываемый по разнице между извлечением свинца в тяжелую фракцию (ϵ_{Pb}) и ее выходом (γ): $Y = \epsilon_{Pb} - \gamma$), на искусственной свинецсодержащей смеси минералов реализован план полного факторного эксперимента с нулевыми уровнями $X_{10} = 0,06$, $X_{20} = 3,0$ и интервалами варьирования $\Delta X_1 = 0,012$ и $\Delta X_2 = 0,6$. Обработка результатов эксперимента показала, что коэффициент взаимодействия превышает коэффициенты факторов, а коэффициент свободного члена превышает результат «нулевого» опыта. Для описания процесса полиномом 2-й степени первоначальный эксперимент дополнен опытами с варьированием факторов на трех уровнях.

После обработки данных эксперимента получена модель процесса в кодовых переменных:

$$Y = 67,811 + 1,830X_1 + 11,947X_2 + 6,457X_1^2 - 15,333X_2^2 + 12,303X_1X_2, \quad (9)$$

приведение которой к каноническому виду показывает, что поверхность отклика представляет собой гиперболический параболоид, имеющий в точке ($X_{1s} = -0,371$, $X_{2s} = 0,240$) минимакс. В экстремальной точке с координатами в натуральных значениях факторов $X_1 = 0,0555$ кг/(ч·см²) и $X_2 = 3,1$ мм/с при выходе тяжелой фракции 15,14 % в нее извлекается 84,05 % Pb при содержании 77,72 % Pb.

С целью определения технологических показате-

телей, получаемых при МЖ-сепарации в плоских вертикальных каналах, реализован двухфакторный двухуровневый эксперимент, в котором независимыми переменными выбраны удельная производительность по исходному питанию — X_1 , кг/(ч·см²) — и расстояние между двумя соседними вертикальными перегородками — X_2 , мм/с. Постоянными условиями опытов были продолжный угол наклона сепарационной кюветы (5°) и виброскорость сепарационной камеры с ФМЖ (3,1 мм/с). Рандомизация заключалась в случайном выборе очередности постановки опытов. Результаты МЖ-сепарации искусственной смеси минералов приведены в табл. 1. Каждый результат является средним из 3 определений.

Уравнение аппроксимирующего полинома имеет вид

$$Y = 80,44 - 3,380X_1 - 4,7775X_2 - 6,544X_1^2 - 4,438X_2^2 - 6,903X_1X_2. \quad (10)$$

Канонический анализ уравнения (10) показал, что поверхность отклика представляет собой эллиптический параболоид с максимумом в центре поверхности при значениях независимых переменных $X_1 = 0,0606$ кг/(ч·см²) и $X_2 = 6,1$ мм, при которых извлечение Pb в тяжелую фракцию составляет 98,69 % при выходе 16,97 % и содержании 81,42 % Pb.

В табл. 2 приведены результаты сравнительных испытаний конкурирующих способов МЖ-сепарации на золотосодержащем шлихе. Предварительно из материала шлиха с применением двух-

Таблица 1
Матрица планирования и результаты опытов

№ опыта	Факторы				Средний результат серии из 3 опытов			Параметр оптимизации, %
	в кодированной форме		в натуральных единицах		Выход тяжелой фракции, %	Содержание Pb, %	Извлечение Pb, %	
	X_1	X_2	X_1	X_2				
1	+1	+1	0,072	8,5	18,66	54,09	72,09	53,43
2	−1	+1	0,048	8,5	17,40	74,14	92,14	74,74
3	+1	−1	0,072	5,5	17,31	76,12	94,12	76,81
4	−1	−1	0,048	5,5	17,59	70,10	88,10	70,51
5	+1	0	0,072	7,0	17,65	69,08	87,08	69,43
6	−1	0	0,048	7,0	17,40	74,10	92,10	74,70
7	0	+1	0,06	8,5	17,65	69,07	87,07	69,42
8	0	−1	0,06	5,5	17,22	78,14	96,14	78,92
9	0	0	0,06	7,0	16,97	80,07	98,07	81,10

Таблица 2

Результаты магнитожидкостной сепарации золотосодержащего шлиха

№ п/п	Наименование продукта	Выход продукта, %	Содержание Au, кг/т	Извлечение Au, %
Магнитожидкостная сепарация в объеме ФМЖ				
1	Тяжелая фракция	8,51	700,70	84,34
2	Легкая фракция	63,72	17,15	15,46
3	Магнитная фракция	27,77	0,51	0,20
4	Исходный шлик	100,0	70,70	100,0
Магнитожидкостная сепарация в плоских вертикальных каналах				
1	Тяжелая фракция	7,52	870,90	91,77
2	Легкая фракция	51,46	11,04	7,96
3	Магнитная фракция	41,02	0,47	0,27
4	Исходный шлик	100,0	71,40	100,0

валкового магнитного сепаратора конструкции ООО «НПП ГЕОС» (г. Владикавказ) [2—4] была выделена магнитная фракция в виде сильно- и слабомагнитных минералов.

Потери металла с легкой фракцией МЖ-сепарации связаны с его «физически упорными» трудно извлекаемыми формами — мелким и тонким золотом в виде тончайших пластинок с рваными краями, чешуек и дендритов с меньшей, по сравнению с золотом комковидной морфологии, плотностью. При переходе от МЖ-сепарации в объеме ФМЖ к сепарации разработанным способом извлечение золота в тяжелую фракцию увеличивается с 84,34 до 91,77 % за счет снижения потерь с легкой фракцией с 15,46 до 7,96 %. Получен материал, содержащий более 800 кг/т золота, что позволяет на месте в условиях предприятия переплавить его на слиток сплава Доре — высоколиквидную товарную продукцию. Извлечение золота при плавке >99,8 %.

Заключение

Золото из шлихов на месте их производства может быть извлечено в продукт, соответствующий требованиям аффинажа, методом магнитожидкостной сепарации. При переходе от магнитожидкостной сепарации в объеме квазитуяженной внешним неоднородным магнитным полем ферромагнитной жидкости к сепарации в плоских вертикальных каналах изменяется закономерность движения материала в рабочей зоне. При извлечении золота из узких каналов увеличивается скорость удаления легкой фракции из рабочей зоны аппарата, что является причиной роста его производительности по тяжелой фракции (~9 %)

и извлечения в нее золота (на 7,43 абс.%). Уменьшение выхода тяжелой фракции (на 11,6 отн.%) обеспечивает снижение эксплуатационных транспортных затрат.

Литература

1. Калаева С.З. Направленное изменение свойств минералов и пород техногенных месторождений для получения магнитных жидкостей, обеспечивающих решение инженерных задач добычи и переработки полезных ископаемых: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Тула: Тульский гос. ун-т, 2015.
2. Солоденко А.А. Развитие теории и практики переработки золотосодержащего сырья комбинированными методами обогащения: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2016.
3. Паньшин А.М., Евдокимов С.И., Артемов С.В. Магнито-жидкостная сепарация золотосодержащих продуктов в вибрационном поле // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2009. No. 6. С. 7—15.
4. Паньшин А.М., Евдокимов С.И. Применение метода магнитно-жидкостной сепарации при обогащении золотосодержащих россыпей // Горн. журн. 2010. No. 1. С. 75—77.
5. Ghazanfari M.R., Kashefi M., Jaafari M.R. Modeling and optimization of effective parameters on the size of synthesized Fe_3O_4 superparamagnetic nanoparticles by coprecipitation technique using response surface methodology // J. Magn. Magn. Mater. 2016. Vol. 405. P. 88—96.
6. Kishimoto M., Miyamoto R., Oda T., Yavagihara H., Ohkohchi N., Kita E. Magnetic fluid with high dispersion and heating performance using nano-sized Fe_3O_4 platelets // J. Magn. Magn. Mater. 2016. Vol. 398. P. 200—204.

7. *Sakellari D., Mathioudaki S., Kalpaxisou Z., Simeonidis K., Angelakeris M.* Exploring multifunctional potential of commercial ferrofluids by magnetic particle hyperthermia // *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. Vol. 380. P. 360—364.
8. *Bahiraei M., Hangi M.* Flow and heat transfer characteristics of magnetic nanofluids: A review // *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. Vol. 374. P. 125—138.
9. *Evdokimov S.I., Evdokimov V.S.* Synthesis of a stable magnetite (magnetic fluid) colloid solution // 5th Global Conf. on Materials Science and Engineering. IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 2017. Vol. 164. P. 4—12.
10. *Пшеничников А.Ф., Буркова Е.Н.* О силах, действующих на постоянный магнит, помещенный в прямоугольную полость с магнитной жидкостью // *Вычисл. механика сплошных сред.* 2014. Т. 7. No. 1. С. 5—14.
11. *Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А.* Моделирование и исследование электротехнической системы регулируемой сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей // *Вестн. Ивановского гос. энерг. ун-та.* 2011. Вып. 2. С. 1—4.
12. *Евтушенко М.Б., Вигдергауз В.Е.* Извлечение мелкого золота магнитогравитационной сепарацией в тонком слое // *Горн. журн.* 2002. No. 8. С. 80—82.
13. *Протодьяконов И.О., Люблинская И.Е., Рыжков А.Е.* Гидродинамика и массообмен в дисперсных системах жидкость—твердое тело. Л.: Химия, 1987.
14. *Страдомский Ю.И., Филиппов В.А.* Анализ геометрии рабочего зазора магнитожидкостного сепаратора // *Сб. науч. тр. 16-й Междунар. Плесской науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям* (сент. 2014 г.) / Под общ. ред. Ю.Б. Казакова. Плес, Иваново: ООО «ПресСто», 2014. С. 411—416.
15. *Перминов С.М., Перминова А.С.* Разработка нового способа формирования высокоградиентных магнитных полей в рабочих зазорах магнитожидкостных герметизаторов // *Вестн. Ивановского гос. энерг. ун-та.* 2013. Вып. 6. С. 56—59.
16. *Евдокимов С.И., Солоденко А.А.* Теория получения магнитных жидкостей и движения минеральных частиц в сепараторах отклоняющего типа // *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2006. No. 4. С. 28—34.
17. *Арефьев И.М., Лебедев А.В.* Оценка максимального размера частиц в магнитных жидкостях // *Коллоид. журн.* 2016. Т. 78. No. 2. С. 252—256.
18. *Пшеничников А.Ф., Лебедев А.В., Радионов А.В., Ефремов Д.В.* Магнитная жидкость для работы в сильных градиентных полях // *Коллоид. журн.* 2015. Т. 77. No. 2. С. 197—207.
19. *Laurent S., Dutz S., Hateli U.O., Mahmoudi M.* Magnetic fluid hyperthermia: Focus on superparamagnetic iron oxide nanoparticles // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2011. Vol. 166. No. 1-2. P. 8—23.
20. *Rajput S., Pittman Jr.C.U., Mohan D.* Magnetic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb²⁺) and chromium (Cr⁶⁺) removal from water // *J. Colloid Interface Sci.* 2016. Vol. 468. P. 334—346.
21. *Drozдов A.S., Ivanovski V., Avnir D., Vinogradov V.V.* A universal magnetic ferrofluid/anomagnetite stable hydrosol with no added dispersants and at neutral pH // *J. Colloid Interface Sci.* 2016. Vol. 468. P. 307—312.

References

1. *Kalaeva S.Z.* Napravlennoe izmenenie svoystv mineralov i porod tekhnogennykh mestorozhdenii dlya polucheniya magnitnykh zhidkостей, obespechivayushchikh reshenie inzhenernykh zadach dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh [Directed change of properties of minerals and technogenic deposits of rocks for magnetic fluids, providing the solution of engineering problems of extraction and processing of minerals]: Abstract of the dissertation of PhD (Tech.). Tula: TulGU, 2015.
2. *Solodenko A.A.* Razvitie teorii i praktiki pererabotki zolotosoderzhashchego syr'ya kombinirovannymi metodami obogashcheniya [Development of theory and practice of processing of gold-bearing raw materials by combined methods of enrichment]: Abstract of the dissertation of PhD (Tech.). Vladikavkaz: SKGMI (GTU), 2016.
3. *Pan'shin A.M., Evdokimov S.I., Artemov S.V.* Magnitozhidkostnaya separatsiya zolotosoderzhashchikh produktov v vibratsionnom pole [Magneto-liquid separation of gold-containing products in the vibrational field]. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya.* 2009. No 6. P. 7—15.
4. *Pan'shin A.M., Evdokimov S.I.* Primenenie metoda magnitno-zhidkostnoi separatsii pri obogashchenii zolotosoderzhashchikh rossypei [Application of magnetic liquid separation in the beneficiation of gold placer]. *Gornyi zhurnal.* 2010. No. 1. P. 75—77.
5. *Ghazanfari M.R., Kashefi M., Jaafari M.R.* Modeling and optimization of effective parameters on the size of synthesized Fe₃O₄ superparamagnetic nanoparticles by coprecipitation technique using response surface methodology. *J. Magn. Magn. Mater.* 2016. Vol. 405. P. 88—96.
6. *Kishimoto M., Miyamoto R., Oda T., Yavagihara H., Ohkohchi N., Kita E.* Magnetic fluid with high dispersion and heating performance using nano-sized Fe₃O₄ platelets. *J. Magn. Magn. Mater.* 2016. Vol. 398. P. 200—204.
7. *Sakellari D., Mathioudaki S., Kalpaxisou Z., Simeonidis K., Angelakeris M.* Exploring multifunctional potential of

- commercial ferrofluids by magnetic particle hyperthermia. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. Vol. 380. P. 360—364.
8. Bahiraei M., Hangi M. Flow and heat transfer characteristics of magnetic nanofluids: A review. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. Vol. 374. P. 125—138.
 9. Evdokimov S.I., Evdokimov V.S. Synthesis of a stable magnetite (magnetic fluid) colloid solution. In: *5th Global Conf. on Materials Science and Engineering. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 164. P. 4—12.
 10. Pshenichnikov A.F., Burkova E.N. O silakh, deistvuyushchikh na postoyanniy magnit, pomeshchennyi v pryamougol'nyuyu polost' s magnitnoi zhidkost'yu [On the forces acting on a permanent magnet, placed in a rectangular cavity with a magnetic fluid]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2014. Vol. 7. No. 1. P. 5—14.
 11. Kazakov Yu.B., Stradomskii Yu.I., Filippov V.A. Modelirovanie i issledovanie elektrotekhnicheskoi sistemy reguliruemoi separatsii nemagnitnykh materialov s ispol'zovaniem nanodispersnykh magnitnykh zhidkостей [Modeling and research of the electro-technical system for controlled separation of non-magnetic materials using nanodispersed magnetic fluids]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2011. Iss. 2. P. 1—4.
 12. Evtushenko M.B., Vigdergauz V.E. Izvlechenie melkogo zolota magnitogravitatsionnoi separatsiei v tonkom sloe [Extraction of fine gold by magnetogravitational separation in a thin layer]. *Gornyi zhurnal*. 2002. No. 8. P. 80—82.
 13. Protod'yakonov I.O., Lyublinskaya I.E., Ryzhkov A.E. Gidrodinamika i massoobmen v dispersnykh sistemakh zhidkost'—tverdoe telo [Hydrodynamics and mass transfer in liquid-solid disperse systems]. Leningrad: Khimiya, 1987.
 14. Stradomskii Yu.I., Filippov V.A. Analiz geometrii rabochego zazora magnitozhidkostnogo separatora [Analysis of the working gap geometry of the magneto-liquid separator]. In: *Sbornik nauchnykh trudov 16 Mezhdunarodnoi Plesskoi nauchnoi konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam [A collection of scientific papers of the intern. scientific conf. on nanodispersed magnetic fluids]*. Ed. Yu.B. Kazakov. Ivanovo: LLC «PresSto», 2014. P. 411—416.
 15. Perminov S.M., Perminova A.S. Razrabotka novogo sposob formirovaniya vysokogradientnykh magnitnykh polei v rabochikh zazorakh magnitozhidkostnykh germetizatorov [Development of a new method for the formation of high-gradient magnetic fields in working gaps of magneto-liquid sealers]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2013. Iss. 6. P. 56—59.
 16. Evdokimov S.I., Solodenko A.A. Teoriya polucheniya magnitnykh zhidkостей i dvizheniya mineral'nykh chastits v separatorakh otklonyayushchego tipa [The theory of obtaining magnetic fluids and the motion of mineral particles in deflecting type separators]. *Izvestiya. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2006. No. 4. P. 28—34.
 17. Aref'ev I.M., Lebedev A.V. Otsenka maksimal'nogo razmera chastits v magnitnykh zhidkostyakh [Estimation of the maximum particle size in magnetic liquids]. *Kolloidnyi zhurnal*. 2016. Vol. 78. No. 2. P. 252—256.
 18. Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V., Radionov A.V., Efremov D.V. Magnitnaya zhidkost' dlya raboty v sil'nykh gradientnykh polyakh [Magnetic fluid for work in strong gradient fields]. *Kolloidnyi zhurnal*. 2015. Vol. 77. No. 2. P. 197—207.
 19. Laurent S., Dutz S., Hateli U.O., Mahmoudi M. Magnetic fluid hyperthermia: Focus on superparamagnetic iron oxide nanoparticles. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2011. Vol. 166. No. 1-2. P. 8-23.
 20. Rajput S., Pittman Jr.C.U., Mohan D. Magnetic magnetite (Fe_3O_4) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb^{2+}) and chromium (Cr^{6+}) removal from water. *J. Colloid Interface Sci.* 2016. Vol. 468. P. 334—346.
 21. Drozdov A.S., Ivanovski V., Avnir D., Vinogradov V.V. A universal magnetic ferrofluidinanomagnetite stable hydrosol with no added dispersants and at neutral pH. *J. Colloid Interface Sci.* 2016. Vol. 468. P. 307—312.